



董淑琦, 席瑞泽, 高舒林, 胡春艳, 郭振宇, 宋喜娥, 赵娟, 李晓瑞, 王家刚, 任建宏, 马永清, 原向阳. 谷子秸秆浸提液及田间覆盖对4种杂草的化感作用研究[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(09): 38-50.

DONG Shuqi, XI Ruize, GAO Shulin, HU Chunyan, GUO Zhenyu, SONG Xi'e, ZHAO Juan, LI Xiaorui, Wang Jiagang, REN Jianhong, MA Yongqing, YUAN Xiangyang. Allelopathic effects of foxtail millet straw extracts and field mulching on four kinds of weeds[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(09): 38-50.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.09.04

谷子秸秆浸提液及田间覆盖对4种杂草的化感作用研究

董淑琦¹ 席瑞泽¹ 高舒林¹ 胡春艳² 郭振宇² 宋喜娥¹ 赵娟¹
李晓瑞¹ 王家刚¹ 任建宏³ 马永清⁴ 原向阳^{1*}

- (1. 山西农业大学 农学院, 山西 太谷 030801;
2. 山西农业大学 植物保护学院, 山西 太谷 030801;
3. 山西农业大学 生命科学学院, 山西 太谷 030801;
4. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要 为探究谷子秸秆浸提液和田间覆盖对4种谷田恶性杂草(反枝苋、藜、狗尾草、稗草)的化感效应,在室内发芽试验中设置谷子秸秆浸提液原液(100 g/L, W_0)、稀释 $10\times(W_1)$ 、 $50\times(W_2)$ 、 $100\times(W_3)$ 液4个浓度和 $H_2O(CK_1)$ 处理,测定处理后4种杂草种子的发芽率、根长、芽长、发芽率化感指数、根长化感指数、芽长化感指数、综合化感指数;大田试验设置遮光量对等的秸秆(F)和地膜覆盖(PF)处理,谷子秸秆覆盖量为2 000(F_1)、4 000(F_2)、8 000 kg/hm²(F_3),地膜遮光处理为50%(PF_1)、70%(PF_2)、100%(PF_3),以露地不覆盖为对照(CK_2),测定田间4种杂草的株数、密度、盖度和杂草防效等指标。结果表明:与 CK_1 相比,谷子秸秆水浸提液对4种杂草种子的发芽率、根长、芽长均具有显著化感作用($P<0.05$),且不同浓度浸提液处理的作用存在显著差异。 W_0 处理对4种杂草种子的发芽率、根长、芽长均有化感抑制作用,对4种杂草种子萌发的抑制效果由强到弱为:藜(-0.86)>狗尾草(-0.84)>稗草(-0.51)>反枝苋(-0.44),对反枝苋根长(-1.00)和稗草芽长(-0.84)的化感抑制效果较强; W_1 和 W_2 处理对4种杂草种子萌发均表现为化感促进作用,化感指数由高到低均为:狗尾草(0.19)>反枝苋(0.16)>稗草(0.05)>藜(0.02); W_3 处理对狗尾草、稗草和反枝苋3种杂草种子的萌发有较弱的化感促进作用。大田试验中,随秸秆覆盖量的增加,4种杂草的密度和总盖度呈现逐渐下降的趋势; F_3 处理在第3次中雨的5 d后对藜、狗尾草、稗草密度仍有显著的化感抑制作用($P<0.05$),3种杂草密度分别比 CK_2 减少61.66%、63.67%、86.68%;3次中雨5 d后的杂草总盖度均在 F_3 处理达到最低,与 CK_2 相比杂草总盖度分别降低24.23%、33.73%、13.56%;在第1次中雨5 d后, F_1 和 F_2 处理的株防效均显著高于 PF_1 和 PF_2 处理,秸秆被雨水淋溶后土壤化感物质浓度增加,导致化感抑制作用增强,分别升高5.23%和19.09%; F_3 处理在第1次中雨5 d后鲜重防效达到最大值,为52.45%,第2次中雨5 d后株防效达到最大值,为68.75%。随着秸秆覆盖时间的延长和降雨次数的增加,秸秆对杂草盖度和密度的化感抑制作用逐渐减弱。综上,谷子秸秆浸提液原液(100 g/L)处理对4种杂草种子萌发、根长、芽长的化感抑制效果最显著;谷子秸秆覆盖量为8 000 kg/hm²(F_3)可替代地膜覆盖用于谷田防除杂草。

关键词 谷子秸秆; 秸秆覆盖; 水浸提液; 杂草防效; 化感作用

中图分类号 S341.6;S451.1

文章编号 1007-4333(2024)09-0038-13

文献标志码 A

收稿日期: 2024-04-11

基金项目: 山西省科技创新重点团队(202204051002036);山西省重点研发计划(2022ZDYF119);山西省现代农业产业技术体系建设专项(2024CYJSTX04);国家重点研发计划(2021YFD1901103-5);国家谷子高粱产业技术体系(CARS-06-14.5-A28);山西省粮食系统研发项目(202001)

第一作者: 董淑琦(ORCID:0000-0002-0749-2808),副教授,主要从事植物化感作用、生物防除农田杂草与现代杂粮生产等研究,E-mail: dong-s-q@163.com

通讯作者: 原向阳(ORCID:0000-0001-6792-6201),教授,主要从事作物化学调控、化学除草与现代杂粮生产等研究,E-mail: yuanxiangyang200@163.com

Allelopathic effects of foxtail millet straw extracts and field mulching on four kinds of weeds

DONG Shuqi¹, XI Ruize¹, GAO Shulin¹, HU Chunyan², GUO Zhenyu², SONG Xi'e¹,
ZHAO Juan¹, LI Xiaorui¹, Wang Jiagang¹, REN Jianhong³,
MA Yongqing⁴, YUAN Xiangyang^{1*}

(1. College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China;

2. College of Plant Protection, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China;

3. College of Life Sciences, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China;

4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract In order to explore the allelopathic effects of foxtail millet straw extracts and field mulching on *Amaranthus retroflexus* L., *Chenopodium album* L., *Setaria viridis* (L.) Beauv, and *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv in foxtail millet field, five treatments of foxtail millet straw extract (W_0 , undiluted, 100 g/L; W_1 , 10 × dilution; W_2 , 50 × dilution; W_3 , 100 × dilution; CK_1 , distilled water control) were set up in the petri dish experiment. The effects on seed germination rate, root length, bud length, germination rate allelopathic index, root length allelopathic index, bud length allelopathic index and comprehensive allelopathic index of four weeds were determined. In the field experiment, the straw (F) and plastic film (PF) mulching treatments with the same shading amount were set up. The foxtail millet straw mulching amount were 2 000 (F_1), 4 000 (F_2), 8 000 kg/hm² (F_3), and the shading amount were 50% (PF_1), 70% (PF_2), 100% (PF_3), with no straw mulching as the control (CK_2) to determine the plant number, density, coverage and weed control effect of four kinds of weeds in the field. The results showed that: Compared with CK_1 , the water extract of foxtail millet straw had significant allelopathic effects on the germination rate, root length and bud length of four kinds of weed seeds, and there were significant differences among different concentrations of aqueous extract. The germination rate, root length and bud length of four weed seeds were all inhibited under W_0 treatment. The inhibition effect on the germination of four kinds of weed seeds from strong to weak was as follows: *C. album* (−0.86) > *S. viridis* (−0.84) > *E. crus-galli* (−0.51) > *A. retroflexus* (−0.44). The allelopathic inhibition effect on the root length of *A. retroflexus* (−1.00) and the bud length of *E. crus-galli* (−0.84) was stronger. W_1 and W_2 dilution treatments showed allelopathic promotion effects on the seed germination of four weeds, the allelopathic indexes from high to low was as follows: *S. viridis* (0.19) > *A. retroflexus* (0.16) > *E. crus-galli* (0.05) > *C. album* (0.02). W_3 treatment showed a weak allelopathic effect on the seed germination of *S. viridis*, *E. crus-galli* and *A. retroflexus*. In the field experiment, the density and total coverage of four weeds decreased gradually with the increase of straw mulching. F_3 treatment still had significant allelopathic inhibition on the density of *C. album*, *S. viridis* and *E. crus-galli* after 5 d of the third moderate rain, and the density three weeds respectively decreased by 61.66%, 63.67% and 86.68% compared with CK_2 . The total coverage of weeds after 5 d of three moderate rains reached the lowest in F_3 treatment, and the total coverage of weeds respectively decreased by 24.23%, 33.73% and 13.56% compared with CK_2 . After 5 d of the first moderate rain, the control effects of F_1 and F_2 treatments were higher than that of PF_1 and PF_2 treatments significantly. The concentration of soil allelochemicals increased after the straw was leached by rainwater, and the allelopathic inhibition effect was enhanced, which increased by 5.23% and 19.09%, respectively. The fresh weight control effect of F_3 treatment reached the maximum value of 52.45% after 5 d of the first moderate rain, and the plant control effect reached the maximum value of 68.75% after 5 d of the second moderate rain. With the extension of straw mulching time and the increase of rainfall times, the allelopathic inhibition of straw on weed coverage and density gradually weakened. In summary, the inhibitory effect of foxtail millet straw extract (100 g/L)

treatment on seed germination, root length and bud length of four weeds was the most significant, and the foxtail millet straw mulching amount of 8 000 kg / hm² (F₃) can replace plastic film mulching for weed control in millet field.

Keywords foxtail millet straw; straw mulching; water extract; weed control effect; allelopathy

谷子(*Setaria italic* L.)为一年生禾本科植物,起源于中国,具有抗旱、耐瘠薄、广适性、营养物质丰富、经济价值高等优点,主要集中在我国北方干旱半干旱地区^[1]。近年来,谷子在国内农业产业发展和结构调整中占有重要地位,是重要的杂粮作物之一^[2]。但是谷田杂草种类繁多,抗逆性强,防除困难,严重影响谷子的产量及品质^[3]。谷子对化学除草剂敏感性强,目前登记的谷田专用除草剂仅有7种,且多为防除阔叶类杂草^[4],谷田除草主要依靠成本高,效率低的人工除草。因此,谷田杂草的生物防除研究对谷子产业化发展有重要的意义。

秸秆覆盖还田可以补充土壤有机质营养成分,改良土壤结构,增加孔隙,降低土壤容重,提高土壤蓄水保墒能力和水分利用效率,从而改善农作物生长的土壤条件,减少杂草发生,降低杂草对农作物的危害程度,为农作物的正常生长创造良好条件,增加农作物的产量^[5-8],秸秆覆盖还田是一种能够实现农业可持续发展的保护性耕作措施^[9-11]。

化感作用是指植物或微生物向环境中释放代谢物质,对其他植物或微生物产生直接或间接的促进或抑制作用^[12-14],是植物适应环境的一种化学响应^[15]。植物化感物质通过根系分泌、茎叶挥发、雨雾淋溶,以及植物残体分解等途径释放到环境中,对自身及其他植物或微生物产生影响^[16]。已有众多关于应用化感物质抑制田间杂草的研究,利用化感物质的促进作用进行作物间的混作、间作、套作,建立有益的种植组合以及通过改进耕作制度等保护生物多样性,减少化感物质的负面影响等^[17]。秸秆覆盖还田后,雨雾淋溶和植物残体腐解是化感物质进入环境的主要途径^[18]。通过水浸液法研究植物间化感作用是最直接有效的途径^[19]。沈雪峰等^[20]研究表明水稻秸秆浸提液低浓度能够促进甜玉米种子的萌发、维持细胞质膜的稳定和完整性,促进幼苗生长。高玉莲等^[21]发现油菜浸提液对向日葵有很强的化感抑制作用。Crawford等^[22]发现谷类作物秸秆覆盖可以使毛豆田杂草的出苗率降低20%,可以抑制杂草幼苗生长。高阳等^[23]发现不同浓度的白草、赖草和硬质早熟禾浸提液都可以抑

制柳枝稷种子的萌发和幼苗的生长,特别是对发芽指数、芽长和幼苗鲜重的影响较为明显。董淑琦等^[24]研究表明谷子秸秆产生的化感物质在一定浓度下会促进小麦种子的发芽和生长。许岳飞等^[25]研究发现不同浓度木豆叶片浸提液对受体植物化感作用强度随浓度增加呈现增强的趋势。目前,秸秆化感作用的研究多集中于主粮作物,关于谷子秸秆对谷田杂草化感作用的相关报道较少。本研究选择反枝苋、藜、狗尾草、稗草这4种谷田常见的恶性优势杂草,通过测定谷子秸秆浸提液对4种杂草种子萌芽期发芽率、根长、芽长和秸秆覆盖后谷田杂草密度、盖度和防效等指标,分析谷子秸秆浸提液及田间覆盖对谷田4种优势伴生杂草生长的影响,旨在探究谷子秸秆对杂草的化感防除作用,以为应用谷子秸秆覆盖还田提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试谷子品种为张家口市农科院选育的‘张杂10号’,供试谷子秸秆收集于山西农业大学农学院试验田,阴干后将其剪成3 cm小段,保存备用。供试杂草藜(*Chenopodium album* L.)、狗尾草(*Setaria viridis* (L.) Beauv)、稗草(*Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv)、反枝苋(*Amaranthus retroflexus* L.)种子于谷子田间采集。

1.2 试验设计

1.2.1 谷子秸秆浸提液制备

将晾干后的谷子秸秆用高速粉碎机粉碎,过80目筛,得到谷子秸秆干粉。将秸秆干粉与蒸馏水以质量比1:10的比例充分混合、溶解于烧杯中,待溶解后置于超声仪中超声提取30 min,静置3~5 min后用纱布过滤,除去残渣。将滤出液在离心机中以6 400 r/min离心3 min,取上清液,即为谷子秸秆水浸提液原液(W₀),浓度为100 g/L,并将原液用ddH₂O稀释10×(W₁)、50×(W₂)、100×(W₃),共4个处理浓度,以清水作为对照(CK₁),4℃备用。

1.2.2 室内发芽试验

将直径为9 cm的培养皿置于灭菌锅中灭菌,每

皿中铺设 2 层灭菌滤纸,各加入 5 mL 谷子秸秆浸提液原液(W_0)、稀释 $10\times(W_1)$ 、 $50\times(W_2)$ 和 $100\times(W_3)$ 液,以加 ddH₂O 为对照(CK_1)。灭菌后每皿均匀点播 30 粒待测杂草种子,每个处理设置 3 次重复,置于 27 ℃、相对湿度(RH)为 50% 的人工气候培养箱中,每日适时补充浸提液,每天同一时间记录每个培养皿发芽数,以前 3 d 的发芽数计算每个处理的发芽指数(GI),以第 6 d 的发芽数计算每个处理的发芽率(GR),同时在第 6 d 用直尺测量杂草种子生长的根长芽长,并计算化感效应指数(RI)^[26-27]。计算公式如下:

$$\text{发芽指数(GI)}=\sum G_i/D_i$$
$$\text{发芽率(GR)}=(G_6/N)\times 100\%$$

式中: G_i ,当天发芽数量; D_i 为发芽时间,d; G_6 为第 6 d 发芽数, N 为每皿杂草种子总数。

$$\text{化感效应指数(RI)}=1-CK/T \text{ 或 } T/CK-1$$

式中:当 $T\geq CK$ 时, $RI=1-CK/T$,当 $T<CK$ 时, $RI=T/CK-1$, T 为处理组数据, CK 为对照组数据。

综合化感效应指数(SE):各处理(秸秆水浸提液的各浓度)对 4 种杂草种子根长、芽长、根鲜重、芽鲜重等相关测量指标化感效应指数(RI)的平均值。

1.2.2 田间杂草试验

试验于山西农业大学农学院农作站试验基地进行,试验采用随机区组试验设计。设 3 种谷子秸秆覆盖还田量(1/4 覆盖量、1/2 覆盖量、全量覆盖量),即覆

盖谷子秸秆量为:2 000 (F_1)、4 000(F_2)、8 000 kg/hm² (F_3),以及遮光量对等的 50% (PF_1)、70% (PF_2)、100% (PF_3) 3 种黑色地膜遮光处理,以露地不覆盖秸秆为对照(CK_2),每处理重复 3 次,小区面积为 30 m²(5 m×6 m)。供试秸秆待谷子出苗后均匀撒于对应小区行间。

谷子秸秆覆盖于垄间还田,在有效降雨中雨后,秸秆中的化感物质被雨水淋溶后,对田间杂草产生化感作用,根据田间杂草生长的观察发现,降雨后 5~7 d 谷子的出生长速度会发生变化。因此,分别于 2020 年 6 月 29 日、7 月 8 日和 7 月 26 日 3 次中雨(根据 GB/T 28592—2012《降水等级》^[28]规定:24 h 内降雨量在 10.0~24.9 mm 为中雨)5 d 后,在各处理小区内进行随机样方调查(表 1),样方面积为 0.25 m²,每个处理选取 3 个样方进行调查,测定样方内杂草种类、株数、盖度等指标^[29],计算公式如下:

田间密度=某种杂草在各调查样本中株数/调查样方面积

盖度=(样方中绿色植被像素点/调查样方总像素点)×100%

株防效=(对照区杂草株数-处理区杂草株数)/对照区杂草株数×100%

鲜重防效=(对照区杂草鲜重-处理区杂草鲜重)/对照区杂草鲜重×100%。

表 1 2020 年试验地降雨量
Table 1 Rain events at the experimental site in 2020

降雨频率 Rainfall frequency	降雨日期 Rainfall date	降雨时段 Rainfall time	降雨量/mm Precipitation	测试日期 Measurement date
第 1 次 First	06-29	8:40—11:30	18.0	07-04
第 2 次 Second	07-08	6:00—14:30	52.3	07-13
第 3 次 Third	07-26	11:30—17:20	43.9	07-31

1.3 数据处理

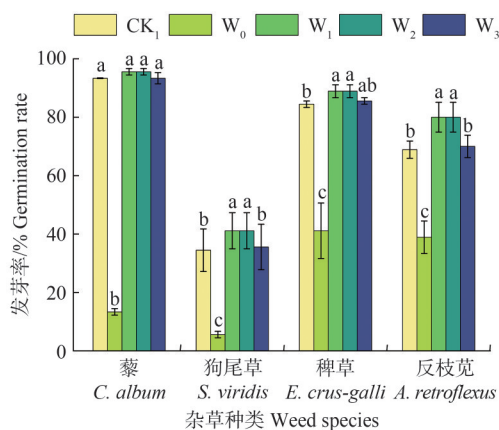
使用 Microsoft Excel 2021 和 IBM SPSS Statistics 25 软件,采用 Duncan 新复极差法分析数据,并用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 谷子秸秆浸提液对谷田杂草种子萌发的影响

由图 1 可知,秸秆浸提液对杂草种子的萌发表

现出不同程度的化感作用。秸秆浸提液原液(W_0)处理藜、狗尾草、稗草和反枝苋种子发芽率分别比对照(CK_1)降低 80.00%、28.88%、43.33%、30.00% ($P<0.05$)。10×稀释液(W_1)处理的藜与 CK_1 无显著差异,其余 3 种杂草种子发芽率均显著高于 CK_1 ($P<0.05$),表现为化感促进发芽的作用。50×稀释液(W_2)处理的狗尾草、稗草和反枝苋种子的发芽率均显著高于 CK_1 ($P<0.05$),表现为化感



CK₁, ddH₂O; W₀, W₁, W₂, W₃ 分别为谷子秸秆水浸提液原液 (100 g/L), 以及用 ddH₂O 稀释的 10× (10 g/L), 50× (2 g/L), 100× (1 g/L) 的溶液。不同小写字母表示不同浓度处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。CK₁, ddH₂O; W₀, W₁, W₂ and W₃ are foxtail millet straw extract undiluted (100 g/L), 10× dilution (10 g/L), 50× dilution (2 g/L) and 100× dilution (1 g/L), respectively. Different lowercase letters indicate significant difference among different concentration treatments ($P < 0.05$). The same below.

图1 不同浓度谷子秸秆浸提液处理下4种杂草种子的发芽率

Fig. 1 Seed germination rate of four kinds of weeds under different concentration of foxtail millet straw extract

促进作用。100× 稀释液 (W₃) 处理的4种杂草种子的发芽率与 CK₁ 无显著差异 ($P < 0.05$), 秸秆浸提液化感作用减弱。W₁、W₂、W₃ 稀释液处理均促进了4种杂草种子的发芽, 随浸提液浓度的降低化感促进作用逐渐减弱, 呈下降趋势。

由图2可知, W₀ 处理的4种杂草种子的发芽指数最低, 显著低于 CK₁ ($P < 0.05$), 藜、狗尾草、稗草和反枝苋种子发芽指数分别降低 88.70%、84.90%、79.42%、66.98%。4种杂草种子的活力随浸提液稀释倍数增加呈现逐渐下降的趋势, W₁、W₂、W₃ 处理的稗草、反枝苋种子的发芽指数均显著低于 CK₁ ($P < 0.05$), 藜、狗尾草种子的发芽指数仅在 W₂、W₃ 处理显著低于 CK₁ ($P < 0.05$)。

2.2 谷子秸秆浸提液对杂草种子生长的影响

由图3可知, 与 CK₁ 相比, W₀ 处理抑制了藜、狗尾草、稗草和反枝苋种子根长的增加, 尤其对反枝苋抑制作用最强。W₁ 处理对藜种子表现出较强的化感促进作用, 对狗尾草、稗草和反枝苋无化感作用。W₂ 处理对藜、狗尾草、稗草和反枝苋种子的根生长表现为较强的化感促进作用, 对藜和稗草的化感促进作用达显著水平 ($P < 0.05$)。W₃ 处理对

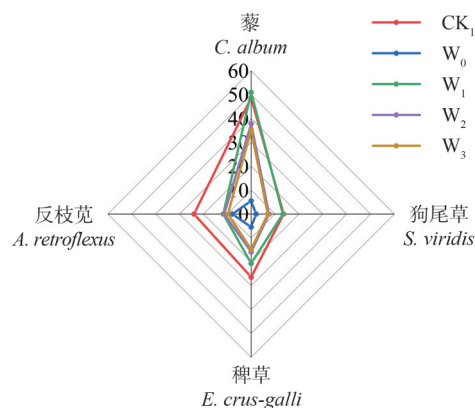


图2 不同浓度谷子秸秆浸提液处理下4种杂草种子的发芽指数

Fig. 2 Seed germination index of four kinds of weeds under different concentration of foxtail millet straw extract

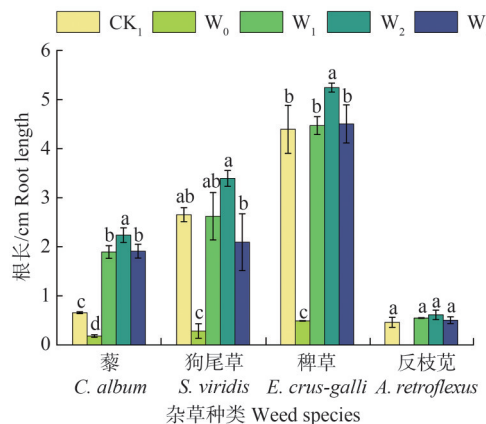


图3 不同浓度谷子秸秆浸提液处理下4种杂草种子的根长

Fig. 3 Root length of four kinds of weeds under different concentration of foxtail millet straw extract

藜种子根的生长有较强的化感促进作用, 对狗尾草、稗草和反枝苋的化感作用不显著 ($P < 0.05$)。

由图4可知, W₀ 处理对藜、狗尾草、稗草和反枝苋种子芽长的生长均产生抑制, 4种杂草种子的芽长均显著低于 CK₁ ($P < 0.05$), 对反枝苋的化感抑制生长作用较弱。W₁ 处理对4种杂草种子芽长生长均表现为较强的化感促进作用。W₂ 和 W₃ 处理对藜、狗尾草和反枝苋3种杂草种子芽长表现为化感促进作用, 且与 CK₁ 相比差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 谷子秸秆浸提液对杂草种子发芽影响化感指数

由图5可知, 不同浓度谷子秸秆水浸提液对藜、狗尾草、稗草和反枝苋的发芽率均有化感作用, W₀ 处理对4种杂草种子的发芽率表现为化感抑制作用, 抑制效果由强到弱为: 藜 > 狗尾草 > 稗草 > 反

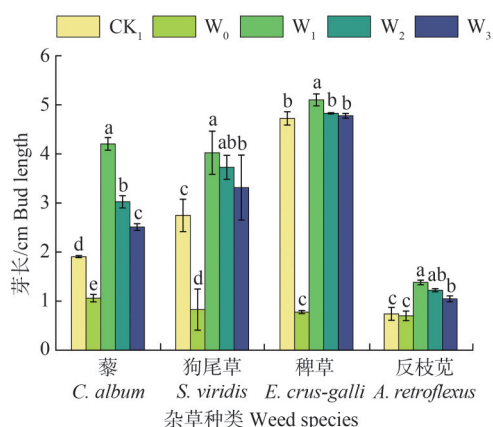


图4 不同浓度谷子秸秆浸提液处理下4种杂草种子的芽长

Fig. 4 Bud length of four kinds weeds under different concentration of foxtail millet straw extract

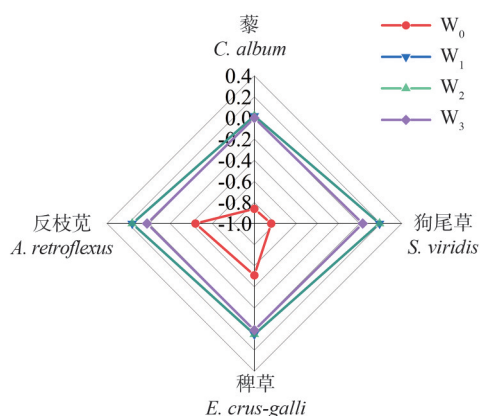


图5 不同浓度谷子秸秆浸提液处理下4种杂草种子的发芽率化感指数 (RI)

Fig. 5 Allelopathic index of seed germination rate of four kinds of weeds under different concentration of foxtail millet straw extract

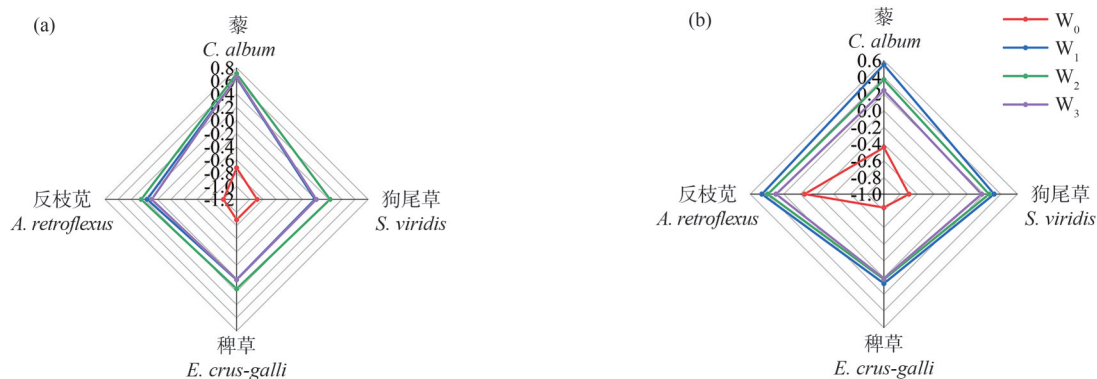


图6 不同浓度谷子秸秆浸提液处理下4种杂草种子的根长(a)和芽长(b)的化感指数 (RI)

Fig. 6 Allelopathic index of seed root length (a) and bud length (b) of four kinds of weeds under different concentration of foxtail millet straw extract

枝苋,化感指数分别为 -0.86 、 -0.84 、 -0.51 和 -0.44 。 W_1 和 W_2 处理对4种杂草种子的发芽率均表现为化感促进作用,由强到弱为:狗尾草>反枝苋>稗草>藜,化感指数分别为 0.19 、 0.16 、 0.05 和 0.02 。 W_3 处理对狗尾草、稗草和反枝苋的发芽率表现为较弱的化感促进作用,由强到弱为:狗尾草>稗草>反枝苋,对藜没有表现出化感作用。

由图6可知,谷子秸秆水浸提液对4种杂草种子根长、芽长的化感作用存在一定差异。 W_0 处理对4种杂草种子根长、芽长均表现为化感抑制作用,对反枝苋根长(-1.00)和稗草芽长(-0.84)的化感抑制效果较强。 W_0 处理对禾本科杂草稗草和狗尾草种子芽长生长抑制作用较强,对阔叶类藜和反枝苋杂草的抑制生长作用则较弱。 W_1 处理对狗尾草和稗草根长生长分别表现为化感抑制和促进作用,但作用均较弱;对藜和反枝苋的根长生长有较强的化感促进作用。 W_1 处理对4种杂草种子的芽长有较强的化感促进作用,对阔叶类杂草促进作用较强,对禾本科类杂草化感促进作用则较弱。 W_2 处理对4种杂草种子根长生长有较强的化感促进作用,由强到弱为:藜(-0.71)>反枝苋(-0.25)>狗尾草(-0.22)>稗草(-0.16)。对藜、反枝苋和狗尾草芽长生长表现较强的化感促进作用,对稗草的促进作用较弱。 W_3 处理对藜的根长生长表现较强的化感促进作用,对反枝苋化感促进作用较弱,对狗尾草和稗草基本没有化感作用;对藜、反枝苋和狗尾草芽长生长均表现为较强的化感促进作用,而对于稗草的芽长生长作用不明显。

2.4 谷子秸秆水浸提液对杂草影响综合化感指数

由图7可知,谷子秸秆水浸提液对藜、狗尾草、稗草和反枝苋的综合化感作用存在一定差异,W₀处理对4种杂草种子的综合化感抑制效果由强到弱为:狗尾草>稗草>藜>反枝苋,综合化感指数分别为-0.81、-0.75、-0.67和-0.50。W₁、W₂、W₃均表现为化感促进作用,对藜、狗尾草和反枝苋表现较强的促进作用,对稗草的促进作用较弱,随谷子秸秆浸提液浓度的降低,对藜的促进作用逐渐减弱。

2.5 谷子秸秆覆盖还田对杂草密度的影响

由表2可知,随田间谷子秸秆覆盖量的增加,藜、狗尾草、稗草和反枝苋的密度表现为逐渐下降的趋势。在第1次中雨5 d后,2 000(F₁)、4 000(F₂)、8 000 kg/hm²(F₃)处理的藜、狗尾草、稗草、反

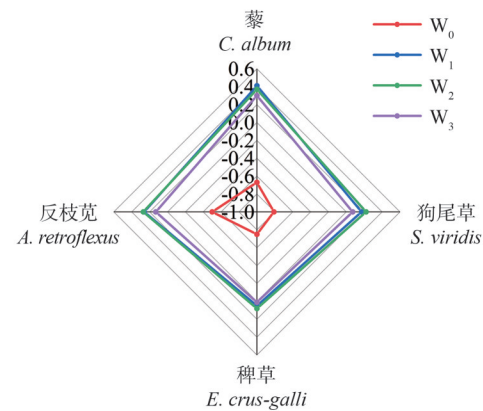


图7 不同浓度谷子秸秆浸提液处理下4种杂草种子的综合化感指数(SE)

Fig. 7 Comprehensive allelopathic index of four kinds of weeds under different concentration of foxtail millet straw extract

表2 不同覆盖量处理下4种谷田杂草的密度

Table 2 Four kinds weeds density under different foxtail millet straw mulching		株/m ²			
降雨频次	处理	藜	狗尾草	稗草	反枝苋
Rainfall frequency	Treatment	<i>C. album</i>	<i>S. viridis</i>	<i>E. crus-galli</i>	<i>A. retroflexus</i>
第1次中雨 First moderate rain	F ₁	61.33±1.62 a	24.00±1.00 a	25.33±2.33 ab	10.67±2.31 b
	F ₂	48.00±2.00 b	21.33±1.62 b	21.33±2.11 ab	4.00±1.00 c
	F ₃	26.67±2.11 e	12.00±1.00 d	16.00±4.00 b	2.67±1.62 c
	PF ₁	41.33±2.86 c	16.00±1.00 c	16.00±4.00 b	2.67±1.62 c
	PF ₂	37.33±2.33 d	14.67±2.31 cd	21.33±2.11 ab	4.00±1.93 c
	PF ₃	—	—	—	—
	CK ₂	65.33±3.07 a	26.67±2.11 a	26.67±2.31 a	12.00±4.00 a
第2次中雨 Second moderate rain	F ₁	64.00±1.58 a	8.00±1.00 ab	21.33±2.31 ab	12.00±2.00 a
	F ₂	45.33±2.90 b	5.33±2.31 b	12.00±1.00 b	1.33±2.31c
	F ₃	14.67±2.11 d	5.33±2.11 b	12.00±1.42 b	—
	PF ₁	29.33±1.24 c	8.00±2.31 ab	18.67±2.31 ab	2.67±1.62 c
	PF ₂	20.00±1.00 d	6.67±1.00 b	16.00±1.00 ab	1.33±2.31 c
	PF ₃	—	—	—	—
	CK ₂	65.33±8.33 a	10.67±6.11 a	26.67±2.31 a	4.00±0.00 b
第3次中雨 Third moderate rain	F ₁	50.67±2.03 b	12.00±4.00 ab	14.67±1.14 b	1.33±0.31 c
	F ₂	34.67±1.04 c	9.33±2.11 b	10.67±1.24 c	1.33±0.31 c
	F ₃	30.67±2.33 c	5.33±2.31 c	5.33±1.11 d	1.33±0.31 c
	PF ₁	21.33±1.11 d	9.33±2.31 b	13.33±2.86 b	2.67±0.62 b
	PF ₂	20.00±2.93 d	5.33±2.31 c	10.67±1.33 c	2.67±0.31 b
	PF ₃	—	—	—	—
	CK ₂	80.00±4.33 a	14.67±2.33 a	40.00±1.93 a	4.00±1.00 a

注:F₁、F₂和F₃分别为谷子秸秆覆盖量2 000、4 000、8 000 kg/hm²。PF₁、PF₂和PF₃分别表示地膜遮光率为50%、70%、100%。“—”表示小区未发现样品,无法取样。同一列不同处理下小写字母表示差异显著(P<0.05),下同。

Note: F₁, F₂ and F₃ are foxtail millet straw mulching amounts of 2 000, 4 000 and 8 000 kg/hm², respectively; PF₁, PF₂ and PF₃ represent 50%, 70%, 100% shading by plastic film, respectively. “—” means that no sample is found, so it can't be sampled. Different lowercase letters in the same column showed significant difference (P<0.05). The same below.

枝苋的密度均低于不覆盖秸秆(CK₂), F₁处理与CK₂差异不大,化感抑制效果不显著。F₂处理对藜和反枝苋化感抑制杂草生长的效果显著,与CK₂相比均达到差异显著水平($P < 0.05$),对狗尾草和稗草抑制效果则不显著。F₃处理对4种杂草生长的化感抑制作用显著,与CK₂相比差异达到显著水平,其中反枝苋的生长受抑制最明显。利用黑色地膜进行50%(PF₁)和70%(PF₂)物理遮光覆盖后,杂草密度大大降低,其中F₁、F₂处理的藜和狗尾草的密度均显著高于PF₁、PF₂处理($P < 0.05$)。因此,第1次中雨5 d后F₁、F₂处理田间4种杂草发生量的减少依赖于秸秆覆盖后的物理遮盖效应。

第2次中雨5 d后, F₁的反枝苋密度显著高于CK₂($P < 0.05$),其他3种杂草密度均低于CK₂,但差异均不显著($P < 0.05$); F₂和F₃的4种杂草密度均低于CK₂,2种处理的藜和稗草的密度均显著低于CK₂($P < 0.05$),其中F₃处理田间藜的密度减少70%以上,稗草的密度减少50%以上。PF₁田间的4种杂草密度与F₁处理相比降低,其中藜的密度显著降低54.17%($P < 0.05$)。因此,在第2次中雨5 d后, F₁的4种杂草发生量的减少依赖于秸秆覆盖后的物理遮盖效应。PF₂田间藜的密度比F₂降低55.88%($P < 0.05$),狗尾草、稗草、反枝苋的密度则增加,见表2。因此,在第2次中雨5 d后, F₂的谷子秸秆物理遮盖效应和化感效应共同抑制了狗尾草、稗草、反枝苋的发生,藜发生量的减少依赖于秸秆覆盖后的物理遮盖效应。

第3次中雨5 d后, F₁和F₂的藜、稗草和反枝苋密度均显著低于CK₂,狗尾草与CK₂相比密度差异不显著($P < 0.05$)。F₃的藜、狗尾草、稗草密度分别比CK₂减少61.66%、63.67%、86.68%($P < 0.05$)。PF₁和PF₂的藜、狗尾草、稗草密度与F₁和F₂相比均降低,反枝苋的密度升高,其中PF₁和PF₂藜的密度比F₁和F₂降低57.90%和42.31%($P < 0.05$); F₃的藜、狗尾草、稗草密度均显著低于CK₂($P < 0.05$),在第3次中雨5 d后,谷子秸秆中的化感物质仍抑制藜、狗尾草、稗草的发生,见表2。因此,谷子秸秆覆盖还田后物理遮盖效应和化感效应共同作用抑制了4种杂草的发生,随着覆盖时间的延长,仅有藜、狗尾草、稗草的田间发生量受到显著抑制。

2.6 谷子秸秆覆盖还田对杂草总盖度的影响

由图8可知,不同谷子秸秆覆盖量处理均使谷

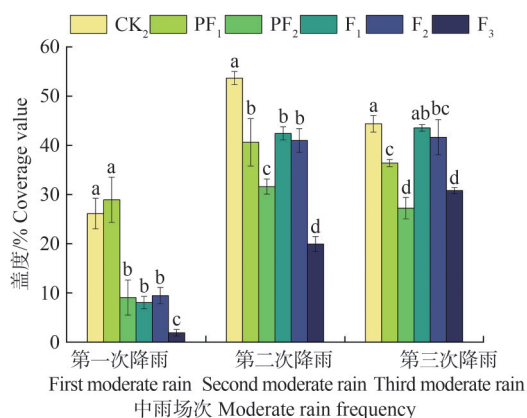


图8 谷子秸秆不同覆盖量下杂草总盖度值

Fig. 8 Total weed coverage under different straw mulching amounts of foxtail millet

田杂草总盖度降低,且随秸秆覆盖量增加杂草总盖度呈现逐渐下降的趋势。在前2次中雨5 d后, F₁、F₂和F₃的杂草总盖度与CK₂相比差异均达显著水平($P < 0.05$)。3次中雨5 d后, F₃的4种杂草总盖度均为最低,与CK₂相比杂草总盖度分别降低24.23%、33.73%、13.56%($P < 0.05$)。第1次中雨5 d后, F₁的杂草总盖度比PF₁降低20.89%($P < 0.05$), F₂的杂草总盖度高于PF₂,故第1次中雨5 d后, F₁依赖谷子秸秆物理遮盖效应和化感效应共同抑制了杂草的生长, F₂主要依赖秸秆物理遮盖效应; F₁、F₂的杂草总盖度在第2次中雨5 d后均高于PF₁、PF₂,且在第3次中雨5 d后, F₁和F₂杂草总盖度分别比PF₁和PF₂升高7.13%和14.39%($P < 0.05$),故F₁、F₂在第2次和第3次中雨5 d后主要依赖秸秆的物理遮盖效应来影响杂草的盖度。随着谷子秸秆覆盖时间的延长,降雨次数增加,秸秆逐渐腐烂降解,对杂草总盖度的影响逐渐降低,杂草总盖度逐渐升高。

2.7 谷子秸秆覆盖还田对杂草防效的影响

由表3可知,杂草株数、鲜重均随谷子秸秆覆盖量增加呈逐渐下降的趋势,株防效、鲜重防效则呈逐渐上升的趋势。随着降雨次数增加,杂草株数、鲜重呈逐渐增加的趋势,株防效、鲜重防效呈逐渐降低的趋势。F₁在第1次中雨5 d后的株防效达到最大,为44.72%,在第2次中雨5 d后的鲜重防效达到最大,为35.53%; F₂在第1次中雨5 d后的株防效达到最大,为58.38%,在第2次中雨5 d后的鲜重防效达到最大,为40.80%; F₃在第1次中雨5 d后的鲜

表3 谷子秸秆不同覆盖量下杂草防效
Table 3 Weed control effect under different foxtail millet straw mulching

降雨频次 Rainfall frequency	处理 Treatment	株数 Number	株防效/% Plant control effect	鲜重/g Fresh weight	鲜重防效/% Fresh weight control effect
第1次中雨 First moderate rain	F ₁	52.00 c	44.72 c	105.67 b	16.30 c
	F ₂	74.67 b	58.38 b	104.33 b	17.30 c
	F ₃	46.67 d	64.51 a	59.33 e	52.45 a
	PF ₁	77.33 b	39.49 d	70.00 c	44.21 b
	PF ₂	76.00 b	39.29 d	60.67 d	51.49 a
	PF ₃	—	—	—	—
	CK ₂	130.67 a	—	125.67 a	—
第2次中雨 Second moderate rain	F ₁	86.67 b	17.29 c	342.00 c	35.53 d
	F ₂	82.67 b	20.87 c	323.33 d	40.80 c
	F ₃	32.00 e	68.75 ab	261.67 f	50.47 a
	PF ₁	45.33 d	64.46 b	363.00 b	32.38 d
	PF ₂	58.67 c	71.22 a	299.00 e	44.40 b
	PF ₃	—	—	—	—
	CK ₂	105.33 a	—	530.00 a	—
第3次中雨 Third moderate rain	F ₁	114.67 b	13.46 e	819.00 b	8.24 d
	F ₂	101.33 c	21.45 d	769.67 c	13.91 c
	F ₃	57.33 d	56.16 c	522.33 e	41.64 a
	PF ₁	44.00 e	64.46 b	800.67 b	10.92 cd
	PF ₂	36.00 f	71.22 a	615.67 d	31.61 b
	PF ₃	—	—	—	—
	CK ₂	134.67 a	—	900.33 a	—

重防效达到最大,为52.45%,第2次中雨5 d后的株防效达到最大,为68.75%。第1次中雨5 d后,F₁、F₂、F₃的4种杂草株数、鲜重均低于CK₂,且株数相较于CK₂均差异显著,F₃的杂草鲜重与CK₂差异达显著水平;F₁、F₂株防效均显著高于PF₁、PF₂($P<0.05$);F₃的株防效、鲜重防效均高于F₁、F₂,株防效与F₁、F₂相比差异显著($P<0.05$),鲜重防效与F₁、F₂相比差异显著($P<0.05$),F₃的株防效、鲜重防分别为64.51%、52.45%。第2次中雨5 d后,F₃的杂草株数、鲜重均低于CK₂,且差异显著;株防效、鲜重防效均高于F₁和F₂;F₁和F₂的株防效均显著低于PF₁、PF₂。第3次中雨5 d后,F₃的杂草株数、鲜重与CK₂相比差异显著,株防效、鲜重防效均显著高于F₁、F₂。

3 讨论

化感作用是导致植物间化学干扰的生态现象,指植物产生和释放化感物质对邻近植物产生促进或抑制作用^[30-31]。植物化感作用主要体现在植物的

种子发芽和幼苗生长方面,不同受体植物化感作用的敏感性存在差异,化感物质具有选择性和专一性,且化感作用与水浸提液的浓度有关^[32]。不同作物秸秆中化感物质对不同杂草种子具有不同的化感效应。Hua等^[33]研究测试了用不同浓度水稻秸秆水浸提液处理藻类细胞,表明水浸提液可以显著抑制藻类细胞的生长。George等^[34]研究发现杨梅产生的MyA化感物质能够抑制乙烯合成,从而影响种子发芽和幼苗生长。Gurmani等^[35]研究表明辣木、银胶菊和大麻叶的提取物组合会显著降低小麦中杂草叶片叶绿素含量和光合速率,有利于小麦的生长发育。董淑琦等^[27]研究表明谷子叶片、茎秆水浸提液对3种杂草均存在显著化感作用,原液表现为化感抑制作用,稀释液表现为化感促进作用,与本试验研究谷子秸秆水浸提液处理结果一致。本研究表明,谷子秸秆浸提液原液(W₀)处理均降低了4种杂草种子的发芽率、根长、芽长,表现为化感抑制作用,3个浓度的稀释液处理(W₁、W₂和W₃)对

4种杂草种子的发芽率、根长、芽长均表现为化感促进作用。 W_0 处理对4种杂草种子发芽率化感抑制效果由强到弱为:藜>狗尾草>稗草>反枝苋; W_1 、 W_2 和 W_3 对4种杂草种子化感促进作用由强到弱为:狗尾草>反枝苋>稗草>藜。谷子秸秆浸提液原液对4种杂草种子的综合化感效应表现为抑制作用,稀释液处理均表现为促进作用。

在作物和杂草之间存在化感作用,使用化感植物覆盖物已被用于作物种植系统中的杂草管理^[36]。农田杂草在作物生长各个季节都有不同程度的发生,杂草大量发生严重影响农作物的产量,当前,世界范围内农田杂草的防除中主要依赖于化学除草,但长时间的化学农药防除导致杂草产生了严重的抗药性,对环境的污染破坏难以逆转^[37-38]。作物释放的化感物质能够抑制杂草生长,应用作物秸秆中的化感物质调控杂草发生,可以减少对化学除草剂的依赖^[39-40]。李昌新等^[41]研究表明,秸秆覆盖还田能够显著降低稻田杂草密度和生物量。Kosterna^[42]发现在化感作用下,荞麦和黑麦秸秆覆盖物能有效抑制西红柿和西兰花菜田中的杂草。许冬等^[43]研究发现小麦秸秆可以有效抑制棉田杂草,促进棉花生长,使化学除草剂及化肥的使用量减少。徐欣等^[44]研究表明免耕秸秆覆盖能够提升土壤碳和氮的含量,使玉米产量增加。地膜能够减少土壤表面水分蒸发、提高土壤表面温度、也具有抑制杂草生长的作用^[45]。潘春丹等^[46]研究发现黑色地膜能够有效控制杂草的发生,但对土壤增温效果较差。郭大辛等^[47]研究表明黑色可降解地膜覆盖对于谷子的增产效果明显,杂草防效表现优异。本研究结果表明,秸秆覆盖还田后,在物理遮盖效应及化感作用下,对4种杂草种子的萌发及生长均起到一定的抑制作用,物理遮盖的杂草密度小于谷子秸秆覆盖的杂草密度,可能与黑色地膜遮光效果好和透气性差有关,从而抑制杂草光合作用,使杂草生长发育受到影响,但还需进一步研究。本研究中,4种杂草密度和总盖度随秸秆覆盖量的增加均呈逐渐下降的趋势,杂草株数、鲜重呈逐渐下降的趋势,株防效、鲜重防效呈逐渐上升的趋势,杂草防效逐渐提高,在全量谷子秸秆(8 000 kg/hm²)覆盖还田时杂草防效最佳。随着秸秆覆盖时间的延长,降雨次数增加,对杂草盖度和密度的影响逐渐降低,表明秸秆对杂草的化感作用减弱。

4 结 论

不同浓度的谷子秸秆浸提液对4种杂草种子的发芽率、根长、芽长等有明显的化感作用,谷子秸秆水浸提液原液(100 g/L)对4种杂草种子的萌发与生长均具有化感抑制作用,稀释液对4种杂草种子的萌发与生长均表现出化感促进作用。谷子秸秆在全量覆盖还田下对4种杂草均具有较好的防除效果,地膜遮盖也能防治杂草的发生,但会造成土壤污染。因此,8 000 kg/hm²谷子秸秆覆盖还田可用于谷田防除杂草。

参考文献 References

- [1] 王海岗,贾冠清,智慧,温琪汾,董俊丽,陈凌,王君杰,曹晓宁,刘思辰,王纶,乔治军,刁现民. 谷子核心种质表型遗传多样性分析及综合评价[J]. 作物学报, 2016, 42(1): 19-30
Wang H G, Jia G Q, Zhi H, Wen Q F, Dong J L, Chen L, Wang J J, Cao X N, Liu S C, Wang L, Qiao Z J, Diao X M. Phenotypic diversity evaluations of foxtail millet core collections[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(1): 19-30 (in Chinese)
- [2] 李顺国,刘斐,刘猛,刁现民. 新时期中国谷子产业发展技术需求与展望[J]. 农学学报, 2018, 8(6): 96-100
Li S G, Liu F, Liu M, Diao X M. Technology need and prospect of foxtail millet industry development in China in the new era[J]. *Journal of Agriculture*, 2018, 8(6): 96-100 (in Chinese)
- [3] 周汉章,侯升林,宋银芳,赵宇,董立,贾海燕,吕芃,王新玉,刘恩魁,薄奎勇. 谷田单子叶杂草对谷子产量损失的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(12): 179-184
Zhou H Z, Hou S L, Song Y F, Zhao Y, Dong L, Jia H Y, Lv P, Wang X Y, Liu E K, Bo K Y. Impacts of monocotyledon weeds on millet yield loss in foxtail millet field [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(12): 179-184 (in Chinese)
- [4] 李志华,景小兰,李会霞,田岗,刘鑫,穆婷婷. 谷子苗期除草剂的安全性及杂草防效研究[J]. 作物杂志, 2017(1): 150-154
Li Z H, Jing X L, Li H X, Tian G, Liu X, Mu T T. Safety and weed control efficiency of foxtail millet seedling stage herbicides [J]. *Crops*, 2017(1): 150-154 (in Chinese)
- [5] 刘超,汪有科,湛景武,杨直毅. 秸秆覆盖量对夏玉米产量影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(4): 64-66
Liu C, Wang Y K, Zhan J W, Yang Z Y. The influence of straw mulch amount to summer maize yield[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2008, 27(4): 64-66 (in Chinese)
- [6] Dossou-Yovo E R, Ampofo E, Igwe A M, Sintondji L O, Agbossou E K. Tillage, Rice straw mulch and nitrogen fertilization effects on upland rice yield in Northern Benin[J]. *Journal of Natural Sciences Research*, 2016, 6(8): 107-117
- [7] 王旭东,庄俊杰,刘冰洋,李帅帅,赵鑫,刘洋,张海林. 秸秆还田条件下中国农田土壤有机碳含量变化及其影响因素的Meta分析[J]. 中国农业大

- 学报, 2020, 25(8): 12-24
- Wang X D, Zhuang J J, Liu B Y, Li S S, Zhao X, Liu Y, Zhang H L. Residue returning induced changes in soil organic carbon and the influential factors in China's croplands: A meta-analysis[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(8): 12-24 (in Chinese)
- [8] Cai T, Zhang C, Huang Y, Huang H, Yang B, Zhao Z, Zhang J, Jia Z. Effects of different straw mulch modes on soil water storage and water use efficiency of spring maize (*Zea mays* L) in the Loess Plateau of China[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2015, 61(6): 253-259
- [9] 胡发龙, 柴强, 甘延太, 殷文, 赵财, 冯福学. 少免耕及秸秆还田小麦间作玉米的碳排放与水分利用特征[J]. 中国农业科学, 2016, 49(1): 120-131
- Hu F L, Chai Q, Gan Y T, Yin W, Zhao C, Feng F X. Characteristics of soil carbon emission and water utilization in wheat/maize intercropping with minimal/zero tillage and straw retention[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(1): 120-131 (in Chinese)
- [10] 薛惠岚, 薛少平, 杨青, 姚万生, 雷树武. 秸秆粉碎覆盖与施肥播种联合作业的实现及机具设计[J]. 农业工程学报, 2003, 19(3): 104-107
- Xue H L, Xue S P, Yang Q, Yao W S, Lei S W. Implementation of combined work of straw crushed for mulching and seeding with fertilizer and design of the machine[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(3): 104-107 (in Chinese)
- [11] 袁磊, 陈欣, 吕丽萍, 马建, 史奕, 贾竞超, 解宏图, 张旭东, 何红波, 梁超, 鲁彩艳. 黑土春玉米田氮素的淋溶风险与阻控机制研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(1): 102-112
- Yuan L, Chen X, Lv L P, Ma J, Shi Y, Jia J C, Xie H T, Zhang X D, He H B, Liang C, Lu C Y. Nitrogen leaching risks and control mechanisms of spring maize fields in black soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(1): 102-112 (in Chinese)
- [12] 周凯, 郭维明, 徐迎春. 菊科植物化感作用研究进展[J]. 生态学报, 2004, 24(8): 1780-1788
- Zhou K, Guo W M, Xu Y C. Advances of research on allelopathic potential in composite[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1780-1788 (in Chinese)
- [13] 包赛很那, 苗彦罕, 邓时梅, 徐雅梅. 苗期紫花苜蓿株体对不同地区垂穗披碱草种子萌发生长的化感作用[J]. 生态学报, 2019, 39(4): 1475-1483
- Bao S, Miao Y J, Deng S M, Xu Y M. Allelopathic effects of alfalfa (*Medicago sativa*) in the seedling stage on seed germination and growth of *Elymus nutans* in different areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(4): 1475-1483 (in Chinese)
- [14] 平晓燕, 王铁梅. 植物化感作用的生态学意义及在草地生态系统中的研究进展[J]. 草业学报, 2018, 27(8): 175-184
- Ping X Y, Wang T M. Ecological significance of plant allelopathy and progress in allelopathy research in grassland ecosystems[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(8): 175-184 (in Chinese)
- [15] 孔垂华. 中国植物化感作用研究 16 年[J]. 应用生态学报, 2020, 31(7): 2139-2140
- Kong C H. Plant allelopathy in China for 16 years[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(7): 2139-2140 (in Chinese)
- [16] 孔垂华. 植物种间和种内的化学作用[J]. 应用生态学报, 2020, 31(7): 2141-2150
- Kong C H. Inter-specific and intra-specific chemical interactions among plants[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(7): 2141-2150 (in Chinese)
- [17] 王建花, 陈婷, 林文雄. 植物化感作用类型及其在农业中的应用[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(10): 1173-1183
- Wang J H, Chen T, Lin W X. Plant allelopathy types and their application in agriculture[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(10): 1173-1183 (in Chinese)
- [18] 赵新梅, 王军, 莫静静, 杨水平, 温明霞, 张雪, 赵建, 陈大霞, 蒋卫. 三种作物茎叶枯落物水浸液对烟草幼苗生长的化感效应[J]. 草业学报, 2016, 25(9): 37-45
- Zhao X M, Wang J, Mo J J, Yang S P, Wen M X, Zhang X, Zhao J, Chen D X, Jiang W. Allelopathic effects of leaf-stem litter water aqueous extracts of three plant species on tobacco seedlings[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(9): 37-45 (in Chinese)
- [19] 李赛飞, 许秋园, 章家恩, 叶延琼. 水稻秸秆-薄膜连续叠加覆盖对三叶鬼针草的控制效果[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(11): 1682-1691
- Li S F, Xu Q Y, Zhang J E, Ye Y Q. Effect of continuous overlay mulching of rice straw-plastic film on control of invasive plant *Bidens pilosa* L[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(11): 1682-1691 (in Chinese)
- [20] 沈雪峰, 胡心怡, 陈勇, 李颜冰, 罗琪宇. 水稻秸秆浸提液对甜玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 作物杂志, 2015(5): 158-160
- Shen X F, Hu X Y, Chen Y, Li Y B, Luo Q Y. Effects of extract solution of rice straw on the germination and seedling growth of sweet corn[J]. *Crops*, 2015(5): 158-160 (in Chinese)
- [21] 高玉莲, 李睿光, 常静, 李妍, 李海平. 油菜对 3 种作物种子萌发和幼苗生长的化感作用[J]. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4153-4160
- Gao Y L, Li R G, Chang J, Li Y, Li H P. Allelopathy of rape on seed germination and seedling growth of three crops[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(12): 4153-4160 (in Chinese)
- [22] Crawford L E, Williams M M, Wortman S E. An early-killed rye (*Secale cereale*) cover crop has potential for weed management in edamame (*Glycine max*)[J]. *Weed Science*, 2018, 66(4): 502-507
- [23] 高阳, 安雨, 徐安凯, 王志锋, 王多伽, 任伟, 于洪柱, 栾博宇. 4 种杂草浸提液对柳枝稷种子萌发的化感作用研究[J]. 种子, 2017, 36(8): 20-25
- Gao Y, An Y, Xu A K, Wang Z F, Wang D J, Ren W, Yu H Z, Luan B Y. Study on allelopathy effect of four different weed extract on seed germination of switchgrass (*Panicum virgatum*)[J]. *Seed*, 2017, 36(8): 20-25 (in Chinese)
- [24] 董淑琦, 原向阳, 胡春艳, 温银元, 郭平毅, 聂磊云, 乔晓芳. 谷子秸秆水浸提液对下茬冬小麦苗期化感作用的影响[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(5): 31-38
- Dong S Q, Yuan X Y, Hu C Y, Wen Y Y, Guo P Y, Nie L Y, Qiao X F. Allelopathic effects of water extracts from foxtail millet straw on winter wheat seedlings[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(5): 31-38 (in Chinese)
- [25] 许岳飞, 毕玉芬, 金晶炜. 木豆化感作用对 6 种灌木种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 云南农业大学学报: 自然科学版, 2008, 23(3): 375-380
- Xu Y F, Bi Y F, Jin J W. Allelopathic Effects of *Cajanus cajan* L on the seed germination and seedling growth of 6 shrub & grass species[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University: Natural Science*, 2008, (3):

- 375-380 (in Chinese)
- [26] 董淑琦, 原向阳, 温银元, 郭平毅, 胡春艳, 聂磊云, 吕亚楠. 谷子秸秆水浸提液对玉米苗期生长的化感作用研究[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(8): 35-42
- Dong S Q, Yuan X Y, Wen Y Y, Guo P Y, Hu C Y, Nie L Y, Lv Y N. Allelopathic effects of the water extracts of foxtail millet straw on maize growth at seedling stage[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(8): 35-42 (in Chinese)
- [27] 董淑琦, 曹鹏, 胡春艳, Sher Alam, 原向阳, 杨雪芳, 郭平毅. 谷子秸秆不同部位水浸液对3种杂草的化感作用[J]. 应用生态学报, 2020, 31(7): 2243-2250
- Dong S Q, Cao P, Hu C Y, Alam S, Yuan X Y, Yang X F, Guo P Y. Allelopathic effects of water extracts from different parts of foxtail millet straw on three kinds of weeds[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(7): 2243-2250 (in Chinese)
- [28] GB/T 28592—2012降水等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012
- China GB/T28592-2012 Grade of precipitation [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012 (in Chinese)
- [29] 董淑琦, 翟旭涛, 胡春艳, 郭振宇, 杨雪芳, 宋喜娥, 郭平毅, 原向阳. 小麦秸秆及浸提液对4种谷田杂草的化感防除作用[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(6): 113-123
- Dong S Q, Zhai X T, Hu C Y, Guo Z Y, Yang X F, Song X E, Guo P Y, Yuan X Y. Allelopathic control effects of wheat straw and extracts on four kinds of weeds in foxtail millet field [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(6): 113-123 (in Chinese)
- [30] Ninkovic V. Volatile interaction between undamaged plants: A short cut to coexistence. [M]//In: Baluška F, Ninkovic V. *Plant Communication from an Ecological Perspective*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010
- [31] Glinwood R, Ninkovic V, Pettersson J. Chemical interaction between undamaged plants-effects on herbivores and natural enemies [J]. *Phytochemistry*, 2011, 72(13): 1683-1689
- [32] 牛欢欢, 王森森, 贾宏定, 陈桂华. 光叶紫花苕子浸提液对4种牧草种子萌发过程的化感作用[J]. 草业学报, 2020, 29(9): 161-168
- Niu H H, Wang S S, Jia H D, Chen G H. Allelopathic effects of extracts of *Vicia villosa* on the germination of four forage seeds [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(9): 161-168 (in Chinese)
- [33] Hua Q G, Yan Z L, Zeng G M, Liu S B, Wang W J, Tan X F, Deng J Q, Tang X, Wang Q P. Allelopathic effect of the rice straw aqueous extract on the growth of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 148: 953-959
- [34] Heslop-Harrison G, Nakabayashi K, Espinosa-Ruiz A, Robertson F, Baines R, Thompson C R L, Hermann K, Alabadi D, Leubner-Metzger G, Williams R S B. Functional mechanism study of the allelochemical myrigalone A identifies a group of ultrapotent inhibitors of ethylene biosynthesis in plants [J/OL]. *Plant Communications*, (2024-03-07), DOI: 10.1016/j.xplc.2024.100846
- [35] Gurmani A R, Khan S U, Mehmood T, Ahmed W, Rafique M. Exploring the allelopathic potential of plant extracts for weed suppression and productivity in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Gesunde Pflanzen*, 2021, 73: 29-37
- [36] Tabaglio V, Gavazzi C, Schulz M, Marocco A. Alternative weed control using the allelopathic effect of natural benzoxazinoids from rye mulch [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2008, 28(3): 397-401
- [37] 强胜, 张欢. 中国农业生态系统外来植物入侵及其管理现状[J]. 南京农业大学学报, 2022, 45(5): 957-980
- Qiang S, Zhang H. Invasion and management of alien plants in agroecosystems in China [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2022, 45(5): 957-980 (in Chinese)
- [38] 李香菊. 近年我国农田杂草防控中的突出问题与治理对策[J]. 植物保护, 2018, 44(5): 77-84
- Li X J. Main problems and management strategies of weeds in agricultural fields in China in recent years [J]. *Plant Protection*, 2018, 44(5): 77-84 (in Chinese)
- [39] 孔垂华. 作物化感品种对农田杂草的调控[J]. 植物保护学报, 2018, 45(5): 961-970
- Kong C H. Allelopathic crop cultivars for weed management in cropping systems [J]. *Journal of Plant Protection*, 2018, 45(5): 961-970 (in Chinese)
- [40] Kong C H, Li Z, Li F L, Xia X X, Wang P. Chemically mediated plant-plant interactions: Allelopathy and allelobiosis [J]. *Plants*, (2024-02-24), 13:626. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13050626>
- [41] 李昌新, 赵锋, 芮雯奕, 黄欠如, 余喜初, 张卫建. 长期秸秆还田和有机肥施用对双季稻田冬春季杂草群落的影响[J]. 草业学报, 2009, 18(3): 142-147
- Li C X, Zhao F, Rui W Y, Huang Q R, Yu X C, Zhang W J. The long-term effects of returning straw and applying organic fertilizer on weed communities in a paddy field with a double rice cropping system [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(3): 142-147 (in Chinese)
- [42] Kosterna E. The effect of soil mulching with organic mulches, on weed infestation in broccoli and tomato cultivated under polypropylene fibre, and without a cover [J]. *Journal of Plant Protection Research*, 2014, 54(2): 188-198
- [43] 许冬, 万鹏, 褚世海, 李儒海. 小麦秸秆高量覆盖对棉花生长发育及产量形成的影响[J]. 南方农业学报, 2021, 52(5): 1191-1197
- Xu D, Wan P, Chu S H, Li R H. Effects of wheat straws under high dosage on growth and yield formation of cotton [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2021, 52(5): 1191-1197 (in Chinese)
- [44] 徐欣, 王笑影, 鲍雪莲, 王影, 刘亚军, 霍海南, 何红波, 解宏图. 长期免耕不同秸秆覆盖量对玉米产量及其稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(3): 671-676
- Xu X, Wang X Y, Bao X L, Wang Y, Liu Y Y J, Huo H N, He H B, Xie H T. Effects of long-term no-tillage and stover mulching on maize yield and its stability [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(3): 671-676 (in Chinese)
- [45] 温蕊, 陈茜午, 赵雅杰, 贾祎明, 卢旭东, 张继宏, 李焕春, 赵沛义, 张永虎. 西北黄土高原旱作区不同地膜覆盖种植模式谷田水温效应及水分利用效率研究[J]. 作物杂志, 2022, (6): 111-117
- Wen R, Chen Q W, Zhao Y J, Jia Y M, Lu X D, Zhang J H, Li H C, Zhao P Y, Zhang Y H. Study on water temperature effects and water use efficiency of paddy field under different plastic film mulching planting patterns in arid area of Loess Plateau in Northwest China [J]. *Crops*, 2022, (6): 111-117 (in Chinese)

- [46] 潘春丹, 陆晓莉, 顾雪梅, 谭禾平. 不同地膜覆盖对土壤温度、杂草控制和甜玉米生长的影响[J]. 上海农业学报, 2023, 39(6): 66-70

Pan C D, Lu X L, Gu X M, Tan H P. Effects of different plastic film mulching on soil temperature, weed control and growth of sweet maize[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2023, 39(6): 66-70 (in Chinese)

- [47] 郭大辛, 郭平毅, 原向阳, 董淑琦, 王东明, 李永虎. 不同地膜覆盖对土壤水温及谷子水分利用和产量构成的影响[J]. 中国农业大学学报, 2017,

22(10): 56-64

Guo D X, Guo P Y, Yuan X Y, Dong S Q, Wang D M, Li Y H. Effects of different film mulching on soil moisture, temperature and water use efficiency, yield components of millet[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(10): 56-64 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 董淑琦, 博士, 硕士生导师, 现为山西农业大学农学院副教授、山西省现代农业谷子产业技术体系岗位专家、中国植物保护学会植物化感作用专业委员会委员、山西省杂粮学会副会长兼秘书长, 主要从事植物化感作用与生物防除杂草, 现代杂粮生产的教学和科研工作。主持国家重点研发计划项目子课题任务、山西省科技重点研发课题等项目 10 多项; 获山西省科学技术进步二等奖和三等奖各 1 项; 以第一作者或通讯作者在 SCI、北大核心期刊等发表学术论文 11 篇; 授权国家发明专利 2 个; 编写地方标准 2 项; 参加国际国内学术研讨会 10 多次并做大会报告。2018、2020 和 2022 年荣获中国作物学会全国农科学子联合实践行动优秀指导教师。



通讯作者简介: 原向阳, 博士, 教授, 博士生导师, 山西农业大学农学院院长, 国家谷子高粱产业技术体系岗位科学家、山西省现代农业谷子产业技术体系首席专家、山西省小米工程技术中心主任、山西省杂粮学会会长, 主要研究领域为: 现代杂粮(谷子)生产; 作物化学调控与化学除草; 作物安全生产理论与技术。先后主持国家自然科学基金 2 项, 其他国家级、省部级项目 20 多项, 发表学术论文 100 多篇, 授权国家专利 20 个, 制定各类标准 7 个, 获山西省科技进步二等奖 1 项和三等奖 2 项、农业农村部主推技术 2 项、省主推技术 3 项。带领团队围绕限制谷子产业发展的技术瓶颈开展工作, 2014 年率先在全国实现谷子的联合收获, 形成有机旱作谷子生产全程机械化技术, 并入选 2020 年全国大众创业万众创新活动周山西分会场“最具市场投资价值产品(项目)”, 研究示范推广工作得到了新华网、山西卫视等媒体的报道。先后获农业农村部“神农青年英才”、山西省第 19 届“五四”青年奖章、“三晋英才”拔尖骨干人才等荣誉称号。